

論文

音響照射加振とレーザドップラ振動計を用いた
非接触浅層地中探査法に関する研究

——珪砂を用いたレーザの照射角度に関する基礎検討——

Study on noncontact shallow underground exploration method using acoustic
irradiation induced vibration and laser Doppler vibrometer:
Fundamental study on laser irradiation angle using silica sand中川 裕*・杉本 恒美¹

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2021年3月12日 受理)

I. はじめに

空中放射音波とレーザドップラ振動計(LDV: Laser Doppler Vibrometer)を用いて、浅層地中に存在する埋設物を探査する手法についての研究が行われている¹⁻⁴⁾。過去の研究では探査対象として対人および対戦車地雷などが想定されているが、第2種縦波という特殊な弾性波を発生させる必要があったために、遠隔からの探査ができなかった。特に地雷は垂直荷重が加わった場合に起爆する物が多い上に、地雷除去を妨害する方法として遠隔制御による起爆や複数の地雷とセットにして埋設する場合もあり、人が接近して地雷の探査および除去することは大きなリスクが伴う行為とされている。そのため、遠隔から非接触かつ非破壊的な探査手法の開発が必要とされている。

そこで、今回は図1に示すように埋設物の真上から音波を土壌表面に照射することにより、埋設物に振動エネルギーを与え、埋設物

自体の振動が土壌表面に伝搬した際の振動分布をLDVにより測定する手法の検討を行った。提案手法では、音源自体はUAV等に搭載することにより、位置を遠隔から自在に移動させることが可能となるため、測定可能範囲が格段に広がることが期待される。また、埋設物が土中にある場合には、埋設物と似た形状の振動分布が測定され、埋設物が無い場所に比べ振動しやすくなることも期待される。

図1に示すようにLDVを用いて測定を行う場合には土壌表面に対して斜めからレーザを照射することになる。遠隔から測定を行う場合にはレーザを照射する角度は必然的に浅い角度となる。その際、レーザの戻り光によ

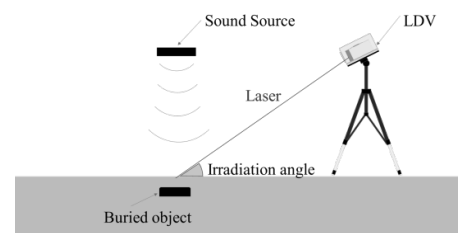


図1 Measurement Setup

* NAKAGAWA Yutaka: Researcher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kuroganecho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

¹ SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

るノイズの増加や加振方向に対してレーザ計測を行う角度が大きくなることで Signal to Noise (S/N) 比の低下が予想される。そこで、今回は LDV と測定箇所との距離はほぼ一定とし、いくつかのレーザの照射角度において測定を行った。

II. 埋設物探査可能なレーザの照射角度

1. 実験セットアップ

今回の実験で使用した埋設物は中空タッパーとし、材質は蓋がポリエチレン、本体がステンレスとなっている。直径は 100 mm で質量は 52.8 g である。図 2 に埋設した容器の写真を示す。埋設時には蓋が上方を向くようにした。

実験に用いる砂槽 (500 × 500 × 300 mm³) に珪砂 (サイズ号数: 7 号、粒径範囲 0.05~0.3 mm) を入れ、埋設物を設置し測定前日から砂袋で加圧を行った。また、埋設物の砂表面からの深さは約 50 mm である。図 3 に実験セットアップを示す。音源としては平面スピーカー (FPS INC, FPS2030M3P1R) を砂槽上方の約 1 m に設置し、珪砂表面の振動を測定する LDV としてはスキャニングレーザドップラ振動計 (SLDV: Scanning LDV, Polytec Corp, PSV-500-Xtra) を使用した。その際、防振ケースは使用しないことにした。

今回検討したレーザの照射角度を表 1 に示す。

表 1 Laser irradiation angle

レーザの照射角度 [deg.]	レーザヘッドと測定面 との距離 [m]
20	0.828
30	0.92
35	1.082
45	1.212
60	1.121
68	1.004

(a) Right above



(b) Diagonally above

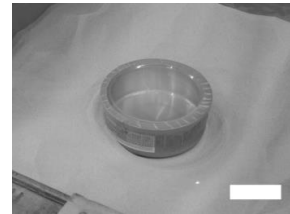


図 2 Photograph of a buried object

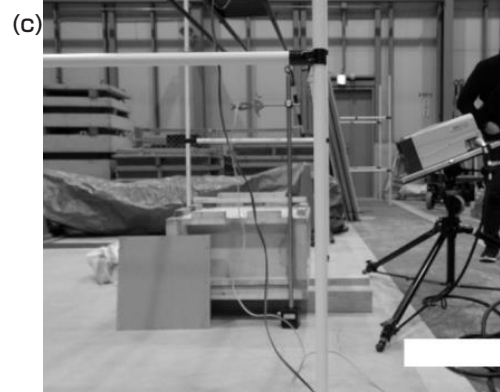
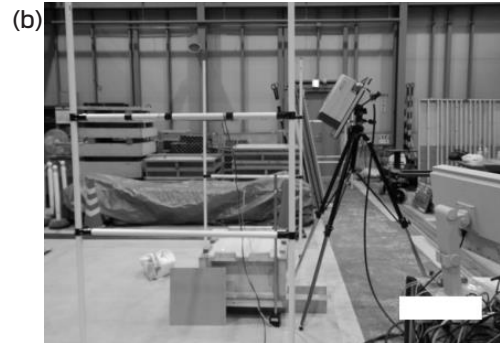
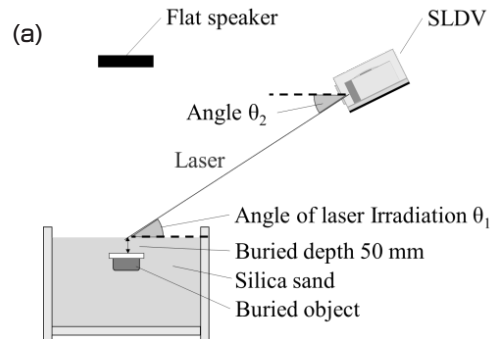


図 3 About laser irradiation angle

(a) Experimental setup

(b) Laser irradiation angle is 68°

(c) Laser irradiation angle is 20°

レーザの照射角度はデジタルアングルメーター（シンワ測定株式会社）を用い、**図3(a)**の角度 θ_2 を測定した値とした。砂槽表面の傾斜が小さい値であると仮定し、レーザの照射角度 $\theta_1 \doteq \theta_2$ とした。

また、今回の測定に使用した音波としてはシングルトーンバースト波^{5, 6)}を使用した。**図4**に波形例を示す。トーンバースト波のパラメータは周波数範囲 100~300 Hz、変調周波数 50 Hz、パルス間インターバル 200 ms、パルス幅 10 ms、波形の長さは 1 s である。測定対象の表面付近での音圧は約 90 dB（Z 特性最大値）である。

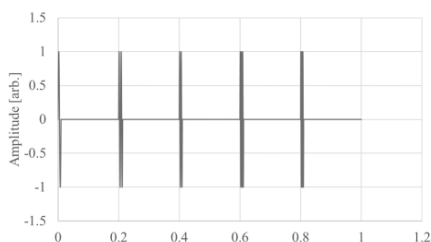


図4 Waveform of single tone burst wave used for measurement

2. 実験結果（レーザ照射角度 68°）

図5に測定エリアを示す。測定点は縦横 11 点（合計 121 点）とし、測定点間隔は約 27 mm である。

次に、レーザの照射角度 68°の時に測定された周波数 152 Hz 時の振動速度分布を**図6**に示す。**図6**は単一周波数における各測定点の振動速度を色として表した分布図である。白い色に近いほど振動速度の値が大きく、黒い色ほど振動速度の値が小さいことになる。図の中央部付近の振動速度が周囲よりも大きくなっていることが確認できる。これは、音響加振により埋設物が振動した影響であると思われる。

次に、**図6**中の埋設物中央付近（丸カーソルの位置）の振動速度スペクトルを**図7**に示す。**図7**より、埋設物上の振動には複数の共振周波数が含まれていることがわかる。そのため、各共振周波数の振動速度分布を**図8**に

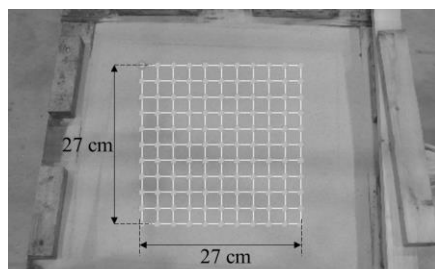


図5 Measurement area

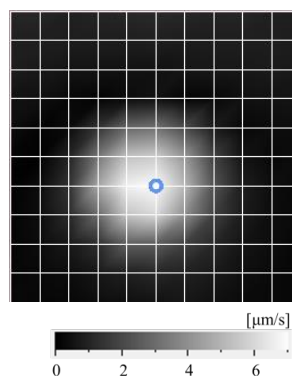


図6 Vibration velocity distribution (Laser irradiation angle is 68°, Frequency: 152 Hz)

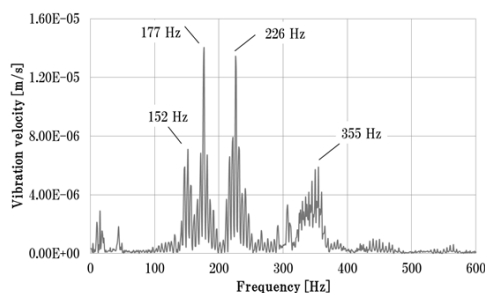


図7 Vibration velocity spectrum on the buried object

示す。

図8より、152 Hz と 177 Hz は 1 次共振のような振動速度分布を示し、266 Hz は高次共振のような振動速度分布を示している。355 Hz は埋設物による振動か判断できない。

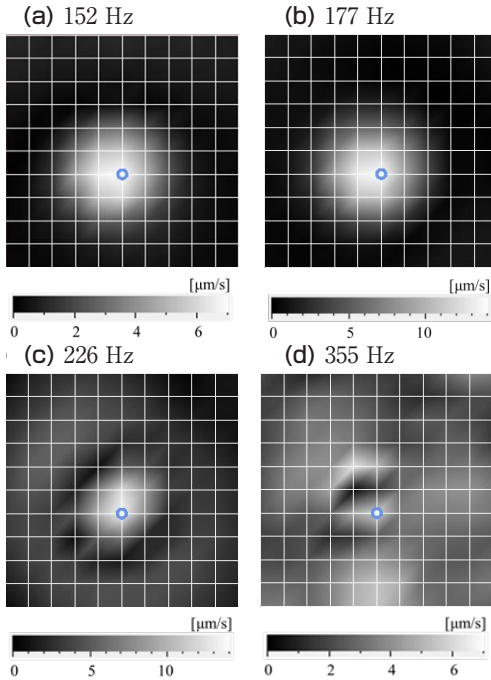


図8 Vibration velocity distribution at each frequency

3. 実験結果（レーザ照射角度を変更した場合）

図9にレーザの照射角度を変更した場合の振動速度分布を示す。図より測定エリアの中心付近において、埋設物の影響と思われる周囲より振動速度の値が高くなる傾向を全ての角度において確認できる。ただし、レーザの照射角度が浅くなると測定エリア上部に振動速度がわずかに周囲より高くなる傾向が出ている。砂槽の大きさとの兼ね合いで出ている可能性もあることから、大型の砂槽で同様の傾向が確認されるか検討する必要があると思われる。

次に、埋設物上の振動速度スペクトルを図10に示す。図10より、各共振周波数はレーザの照射角度が浅くなるにつれて振動速度の値が低下していることが確認できる。この結果からレーザの照射角度は、遠隔から探査を行う際に埋設物を検知できるか否かに関わってくる重要な要素であるということが分かる。

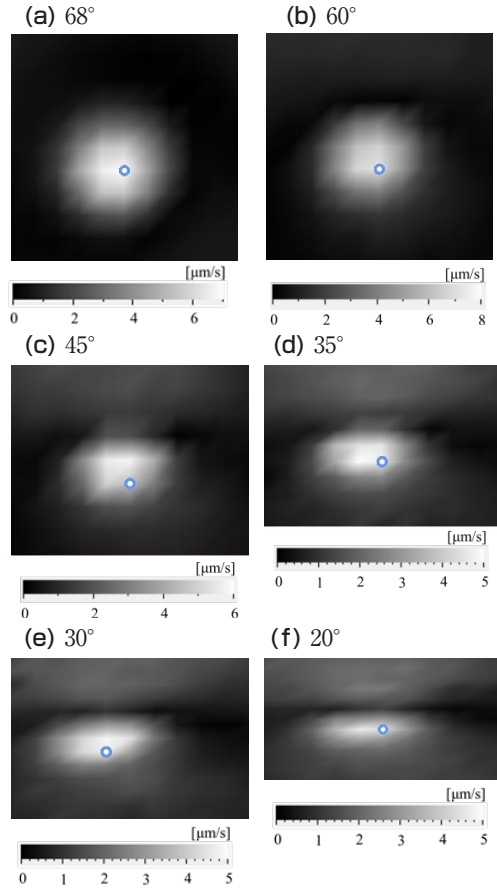


図9 Irradiation angle of laser and vibration velocity distribution (Frequency: 152 Hz)

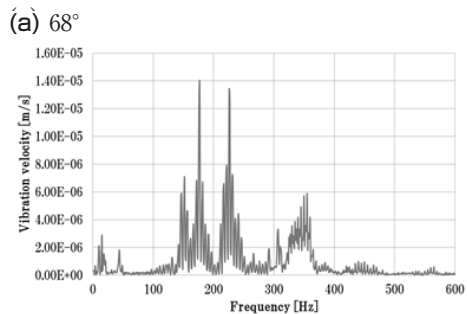
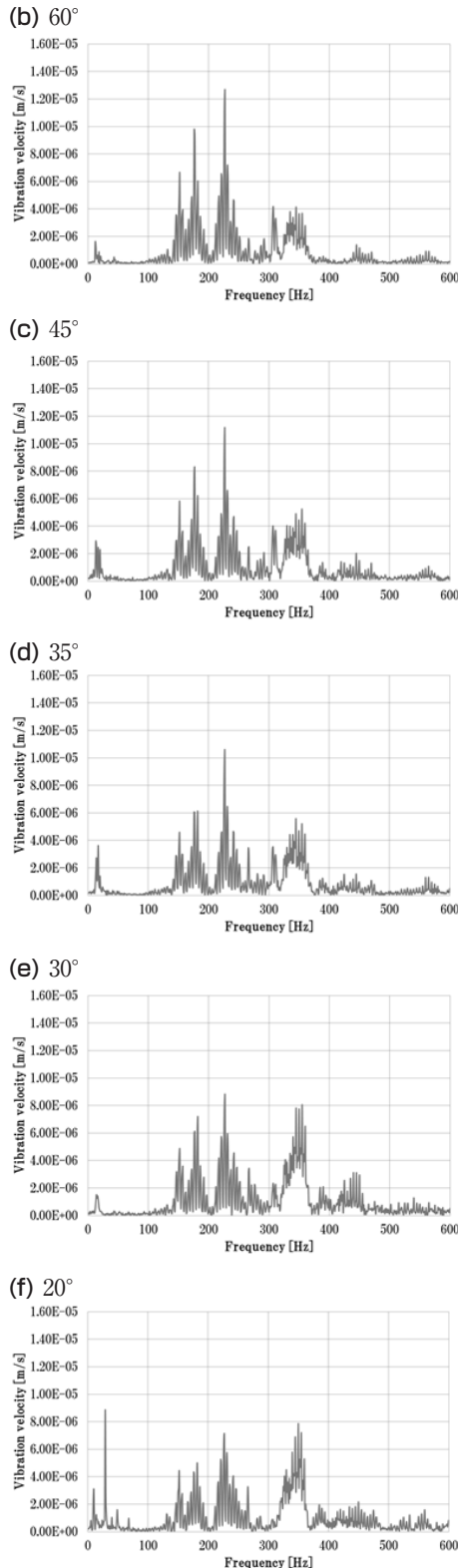


図10-(a)~(f) Vibration velocity spectrum on the buried object



Ⅲ. まとめと今後の課題

今回、測定面に対してレーザの照射角度を変更した実験を行った。その結果、測定面とレーザヘッドの距離が約 1 m 程度では、埋設物を検出できる可能性があるレーザの照射角度は $68^{\circ} \sim 20^{\circ}$ まで確認された。これは、PSV-500-Xtra が高感度であることと今回使用した珪砂がレーザ光を散乱しやすいこと、埋設物の深さが浅いことなどが要因と思われる。ただし、レーザの照射角度が浅くなると測定エリア上部に振動速度がわずかに周囲より高くなる傾向が出ている。砂槽の大きさとの兼ね合いで出ている可能性もあることから、今後は大型砂槽での実験および研究室において計測原理の確認等を行う予定である。

謝辞

本研究は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けたものである。

【参考文献】

- 1) T. Abe and T. Sugimoto: Jpn. J. Appl. Phys. 49, 07HC15 (2010).
- 2) T. Sugimoto, T. Abe, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 07HC18 (2011).
- 3) J. M. Sabatier and N. Xiang, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 39 (2001) 1146.
- 4) N. Xiang and J. M. Sabatier, J. Acoust. Soc. Am. 113 (2003) 1333.
- 5) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, and K. Katakura, Proc. IEEE Int. Ultrasonics Symp., 2012, p.94.
- 6) T. Sugimoto, K. Sugimoto, N. Kosuge, N. Utagawa, and K. Katakura, Jpn. J. Appl. Phys. 56, 07JC10 (2017).